

和文要旨

この論文は、トンネル建設分野において、フラクタル画像解析を用いたトンネルの安定性評価の新しい手法について提案した。さらに、この手法を実際のトンネル建設工事に適用した事例を提示した。この手法は、トンネル切羽岩盤の安定性ならびに支保パターンの評価と、トンネル切羽前方の断層位置の予測、の2つの方法から成り立っている。

亀裂性岩盤において建設されるトンネルの安定性は、亀裂や風化の発達程度といった地質的特性に影響を受けやすい。したがって、トンネル切羽前方における岩盤の地質的特性を予測することは、防災およびトンネルの経済的建設工事の観点から非常に重要である。さらに、的確なトンネル支保パターンを選択するためには、地質状況を客観的かつ迅速に評価するシステムが必要とされている。

この手法は、建設工事を止める必要がなく、日常の建設工事管理に取り込んで用いることができる。さらに、デジタルカメラとE-mailを用いることで、迅速な解析が可能であるという利点がある。画像処理ならびにボックスカウンティング法によるフラクタル解析によって、トンネル切羽面の画像はフラクタル次元で表現される。トンネル切羽岩盤の安定性評価ならびに支保パターンの評価は、個々のフラクタル次元の値にもとづいて判定される。また、トンネル切羽面前方の断層位置の予測は、これらのフラクタル次元の変化にもとづいて判定される。

実際のトンネル建設工事への適用では、個々のフラクタル次元の値と、岩盤の地質状況、岩盤の変形特性や、実際に使用されたトンネル支保パターンとの間には、良い相関性が認められた。また、トンネル切羽前方の断層位置の予測結果と実際の断層位置が良く一致した。

英文要旨

ABSTRACT: This paper proposes a new technique to evaluate the stability of tunnel as an application of image analysis based on fractal geometry in the field of tunnel construction, also introduces a case in which this technique was actually applied to tunnel construction. The technique consists of two methods. One method is evaluation of stability at tunnel faces as well as tunnel support patterns, and the other is prediction of fault positions ahead of tunnel face.

The stability of constructing tunnel at fractured rocks is susceptible to geological characteristics depending on the degree of cracking and weathering. Thus, it is important to predict geological characteristics of rock ahead of tunnel face both from the viewpoint of safety and of economical construction of tunnel. Moreover, the system is necessary objectively and rapidly for evaluating geological conditions to choose appropriate tunnel support patterns.

This technique can be used in daily construction management without need to suspend a construction work. Moreover, it has the advantage that the analysis can be done rapidly on demand using a digital camera and E-mails.

The pictures of tunnel face were taken on site using a digital camera and fractal analysis was done. The picture of the tunnel face has been made to represent fractal dimensions by image processing, and fractal analysis has been conducted using box-counting methods. Evaluation of both the stability of tunnel face and the tunnel support pattern are based on the value of each fractal dimension, and prediction of the fault position ahead of tunnel face is based on changes in these fractal dimensions.

In the actual tunnel construction application, correlation was found between fractal dimensions and such attributes as geological conditions, deformation properties and tunnel support pattern. Also, the prediction of fault positions ahead of tunnel face confirmed the actual position of faults.

仏文要旨

RÉSUMÉ: Ce document propose la nouvelle technique qui évalue la stabilité des tunnels comme application de image analysis fondé sur la géométrie fractale dans le domaine de la construction des tunnels, et introduit le cas pour lequel cette technique a été appliquée effectivement à la construction de tunnels. Cette technique consiste en deux méthodes. Une méthode que l'autre méthode évalue la stabilité du face de tunnel et la configuration du support de tunnel les deux, tandis prédit la position des défauts devant la face du tunnel.

La stabilité de construction de tunnels aux roches fracturé est sensible aux caractéristiques géologiques selon l'étendue des craquelures et de la dégradation. Par conséquent, la prédiction des caractéristiques géologiques de ces roches devant la face de tunnels est très importante aussi bien du point de vue de sécurité que du point de vue de l'économie dans la construction des tunnels. D'autre part, le système qui évalue objectivement et rapidement les conditions géologiques, est nécessaire pour choisir la configuration correcte du support du tunnel.

Cette technique peut s'utiliser pour la gestion quotidienne des constructions sans être obligé d'interrompre les travaux. En plus, il y a l'avantage que l'analyse peut être effectuée rapidement sur exigence en utilisant un appareil photo numérique et le courrier Internet.

Les images de la face du tunnel furent prises sur le site en utilisant un appareil photo numérique et une analyse fractale a été effectuée. L'image de la face du tunnel fut exécutée pour représenter les dimensions fractales par le traitement des images et l'analyse fractale a été exécutée avec la méthode de comptage de boîte. L'évaluation de la stabilité du face de tunnel et la configuration du support du tunnel se base sur la valeur de la dimension fractale les deux, et la prédiction de la position de défaut devant la face du tunnel se base sur les changements de ces dimensions fractales.

Dans une application de construction de tunnel, une bonne corrélation a été observée entre les dimensions fractales et ainsi qu'il suit des conditions a géologie, et les propriété de la déformation, et la configuration du support du tunnel, et le résultat est bien conforme avec la prédiction de la position de défaut devant la face du tunnel.

独文要旨

ZUSAMMENFASSUNG: In dieser vorliegenden Abhandlung wird eine neue Technik vorgeschlagen, die Beurteilung der Stabilität von Tunneln durch die Anwendung von bild analyse nach einem Fraktal geometrie im Tunnelbau ermöglicht; darüber hinaus wird ein konkretes Anwendungsbeispiel dieser Technik beschrieben. Die Technik besteht die den beiden folgenden Verfahren: Beurteilung die Stabilität beim Verwerfungen vor der Tunnelstirnseite und der Form der Tunnelabstützung beide und, Prognose der Position von Verwerfungen vor der Tunnelstirnseite.

Die Stabilität beim Bau von Tunneln durch zerklüftetes Gestein hängt von den geologischen Bedingungen ab, die durch das Ausmaß von Rißbildung und Verwitterung bestimmt sind. Daher ist die Prognose der geologischen Bedingungen im Gestein vor der Tunnelstirnseite sehr wichtig sowohl im Interesse der Betriebssicherheit als auch eines wirtschaftlichen Tunnelbaus. Darüber hinaus muß ein System zur objektiven und schnellen Beurteilung der geologischen Bedingungen auch die Bestimmung der richtigen Form der Tunnelabstützung erlauben.

Die hier beschriebene Technik läßt sich während der laufenden Bauarbeiten einsetzen, ohne daß diese unterbrochen werden müssen. Außerdem bietet sie den Vorzug, daß die Analyse rasch auf **Verlangen** mit Hilfe von Digitalkameras und E-Mail kommunikation über das Internet durchführbar ist.

Die Bilder der Tunnelstirnseite wurden vor Ort mit einer Digitalkamera aufgenommen und anschließend einer Fraktalanalyse unterzogen. Durch entsprechende Verarbeitung des aufgenommenen Bilds der Tunnelstirnseite wurde eine Darstellung der Fraktalabmessungen erreicht, und die Fraktalanalyse erfolgte mit Hilfe der "Box-counting-Methode". Die Beurteilung der Form der Tunnelabstützung auf dem Wert der Fraktalabmessungen und die Prognose von Verwerfungspositionen vor der Tunnelstirnseite basiert auf Änderungen dieser Fraktalabmessungen. Es ergab sich auch eine gute Korrelation zwischen den Fraktalabmessungen und wie folgt der Geologisch bedingung und der Umformung eigentum der Form der Tunnelabstützung, und Bei Anwendung im praktischen Tunnelbau zeigte die Prognose der Verwerfungsposition vor der Tunnelstirnseite eine gute Übereinstimmung mit den tatsächlichen Gegebenheiten.

記号一覧

| | |
|------------------|---|
| i | 変数 |
| E_i | 切羽観察項目の換算点 |
| r_i | 切羽観察項目の判定ランク |
| R_i | 切羽観察項目のランク数 |
| PM | 地山総合評価点 |
| N | 切羽観察項目総数 |
| PW | 地山総合評価点 |
| a_i | 切羽観察項目 i に対する重み係数 (式 (2.3)) |
| E_i | 切羽観察項目 i の換算点 |
| N | 切羽観察項目総数 |
| RQD | 亀裂の頻度を表す指標% (Rock Quality Designation) |
| J_n | 不連続面系の数 |
| J_r | 不連続面の粗さ |
| J_a | 不連続面の変質度 |
| J_w | 不連続面の水の状態 |
| SRF | 応力状態 (Stress Reduction Factor) |
| RQD/J_n | 岩塊の大きさ |
| J_r/J_a | 岩塊の表面のせん断強度 |
| J_w/SRF | 岩盤の挙動に影響する周辺の状態 |
| M_m | m 番目の計測データ |
| a_i | 切羽観察項目 i に対する偏相関係数 (式 (2.5)) |
| b_{ij} | 項目 i ランク j の重み係数 |
| $\delta_{ij}(m)$ | 対応する観察データが項目 i のランク j であれば 1、その他であれば 0 の値となるデルタ関数 |
| η | 測定された 2 次元平面上の亀裂系の図上全体を正方格子網で被覆したときの一辺の長さ |
| $N(\eta)$ | 測定された 2 次元平面上の亀裂系の図上全体を一辺の長さ η の正方格子網で被覆したときの亀裂と交差した格子の数 |
| D | ボックスカウンティング法によるフラクタル次元 |
| U | 岩盤亀裂分布の全体集合 |
| u_i | 岩盤亀裂分布の部分集合 ($i=1,2,3,\dots,n$) |
| P | ボックスカウンティング法における格子網の幅 (単位はピクセル) |
| $N(P)$ | 格子網の幅が P のときの亀裂部分のカウント数 |
| L/S | 天端変位比 |
| L | 天端沈下量トンネル縦断水平変位成分 |

| | |
|-----------------------|---|
| S | 天端沈下量鉛直変位成分 |
| J_d | 岩盤亀裂密度 (%) |
| P_j | 画像解析での亀裂箇所の画素数 (単位はピクセル) |
| P_a | 画像解析での解析領域の画素数 (単位はピクセル) |
| δ | フラクタル次元変化率 |
| L | 断層破碎帯の主変位面から解析領域までの距離 |
| γ | 断層破碎帯のフラクタル次元 (断層の成熟度につれて 1.6 程度に収束する値) |
| L_f | 断層位置 |
| D_f | 断層位置 L_f におけるフラクタル次元 |
| σ_c | 一軸圧縮強度 |
| γ | 単位体積重量 |
| H | トンネルの土被り |
| G_N | 地山強度比 ($= \sigma_c / (\gamma \times H)$) |
| ΔV | 最大天端沈下量 |
| ΔH | 最大内空変位量 |
| λ | 変位比率 ($= (0.5 \times \Delta H) / \Delta V$) |
| Z | 内空変位量の鉛直方向成分 |
| V_v | 天端沈下量・3日間初期変位速度 |
| V_h | 内空変位量・3日間初期変位速度 |
| t | 時間変数 |
| $f(x)$ | 定常的な造構応力場によって領域に及ぼす時間発展関数 |
| X_t | 時間 t における領域 |
| $f(X_t)$ | ある時間 t の領域 X_t に対して形成される領域 |
| f_i | 異なった局所的応力場に対応する関数 ($i=1,2,3,\dots,n$) |
| X_i | 部分領域 ($i=1,2,3,\dots,n$) |
| U | 部分領域 X_i ($i=1,2,3,\dots,n$) で構成される全体集合 |
| REV | 岩盤を代表する最小寸法 (代表容積要素: Representative Elemental Volume) |
| S | 岩盤亀裂面の面積 |
| r | 岩盤亀裂面の面積 S と面積の等しい円で近似したときの円の直径 |
| $f(r)$ | 直径 r の確率密度関数 (亀裂の寸法分布) |
| $P(r)$ | 亀裂面の直径が r よりも大きい亀裂の存在確率 (分布関数) |
| k | 比例定数 |
| \hat{r} | 対象とする亀裂の最小寸法 |
| $\langle r^2 \rangle$ | 亀裂面の直径 r の二次モーメント |
| X | 岩盤亀裂系領域 |
| k_0 | 定数 |

| | |
|------------------|--|
| $M^k(X)$ | X のハウスドルフ k 次元測度 |
| α | 正の定数 |
| l_j | 最小測定亀裂長さ |
| l_r | 対象領域（正方形領域としたとき）の辺長 |
| d | 変数（次元空間） |
| j | 変数 |
| P_j | d 次元空間に分布する亀裂の集合を間隔 η の格子に切って、それぞれの格子に番号をつけたときの j 番目の格子に亀裂が入る確率（確率測度） |
| α_j | 特異性指数（亀裂が j 番目の格子に入る確率を見積る量、 j 番目の格子の局所的フラクタル次元を表わす量） |
| $N_\eta(\alpha)$ | 特異性指数が α である格子の個数 |
| $f(\alpha)$ | 特異性スペクトル（特異性指数 α をもつ部分領域のフラクタル次元） |

式一覽

$$E_i = \frac{r_i}{R_i} \times 100 \quad (2.1)$$

$$PM = \sum_{i=1}^N E_i / N \quad (2.2)$$

$$PW = \sum_{i=1}^N (a_i \times E_i) / \sum_{i=1}^N a_i \quad (2.3)$$

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (2.4)$$

$$M_m = \sum_{i=1}^N a_i \cdot \sum_{i=1}^K b_{ij} \cdot \delta_{ij}(m) \quad (2.5)$$

$$D = - \frac{d \log_2 N(\eta)}{d \log_2 \eta} \quad (2.6)$$

$$D = - \frac{d \log N(\eta)}{d \log \eta} \quad (2.7)$$

$$D = - \frac{\Delta \log N(P)}{\Delta \log P} \quad (3.1)$$

$$J_d = (P_j / P_a) \times 100 \quad (4.1)$$

$$D = 0.3243 \times \log J_d + 0.5207 \quad (4.2)$$

$$D = -\delta L + \gamma \quad (4.3)$$

$$\delta = |\Delta D / \Delta L| \quad (4.4)$$

$$D = 0.0061L + 0.8422 \quad (4.5)$$

$$D = 0.012L + 0.3911 \quad (4.6)$$

$$\lambda = (0.5 \times \Delta H) / \Delta V \quad (4.7)$$

$$X_{t+1} = f(X_t) \quad (4.8)$$

$$U = \bigcup_{i=1}^n f_i(X_i) \quad (4.9)$$

$$P(r) = \int_r^\infty f(x) dx \quad (4.10)$$

$$f(r) = \frac{dP(r)}{dr} \quad (4.11)$$

$$P(r) \propto r^{-D} \quad (4.12)$$

$$f(r) = k r^{-(D+1)} \quad (4.13)$$

$$\int_{\bar{r}}^\infty f(r) dr = k \int_{\bar{r}}^\infty r^{-(D+1)} dr = 1 \quad (4.14)$$

$$f(r) = D\widehat{r}^{-D(D+1)} \quad (4.15)$$

$$\langle r^2 \rangle = \int_{\bar{r}}^{\infty} r^2 f(r) dr = D\widehat{r}^D \int_{\bar{r}}^{\infty} r^{-(D+1)} dr \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} M^k(X) &\cong \lim_{\eta \rightarrow 0} \left\{ \sum_{i=1}^{N(\eta)} (\sqrt{2}\eta)^k \mid \eta_i = U_i \text{ の一辺の長さ、 } X \subseteq \bigcup_{i=1}^{N(\eta)} U_i : U_i \text{ は正方形} \right\} \\ &= \lim_{\eta \rightarrow 0} \{ N(\eta) \times (\sqrt{2}\eta)^k \} \end{aligned} \quad (B.1)$$

$$N(\eta) = \alpha \eta^{-k_0} \quad (\alpha \text{ は正の定数}) \quad (B.2)$$

$$\lim_{\eta \rightarrow 0} \{ N(\eta) \times (\sqrt{2}\eta)^{k_0} \} = \sqrt{2}^{k_0} \alpha \quad (B.3)$$

$$M^{k_0}(X) \cong \sqrt{2}^{k_0} \alpha \quad (B.4)$$

$$\log N(\eta) = -k_0 \log \eta + \log \alpha \quad (B.5)$$

$$y = -k_0 x + \log \alpha \quad (B.6)$$

$$D = -\frac{d \log N(\eta)}{d \log \eta} \quad (B.7)$$

$$N(\eta) \propto \eta^{-D} \quad (C.1)$$

$$p_j \propto \eta^{\alpha_j} \quad (C.2)$$

$$N_\eta(\alpha) \equiv \sum_j \delta(\alpha_j - \alpha) \propto \eta^{-f(\alpha)} \tag{C.3}$$